

近断层强地震动预测中的有限断层震源模型

王海云^{1,2}, 谢礼立^{1,2}, 陶夏新^{2,1}

1. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江哈尔滨 150080

2. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001

摘要: 提出了近断层强地震动预测中建立活断层上设定地震有限断层震源模型的方法和步骤. 首先, 根据地震地质和地震活动性调查以及地球物理勘探等资料, 确定活断层的空间方位和滑动类型; 然后, 根据地震定标律确定活断层的宏观震源参数; 第三, 将高强体模型与 k 平方滑动模型相结合, 产生断层破裂面上的混合滑动分布. 在此基础上, 预测了与 1994 年 Northridge 地震断层类型、矩震级 (M_w 6.7) 基本一致的设定地震的有限断层震源模型. 最后, 将预测的有限断层震源模型与基于地震学的、使用动力学拐角频率的地震动随机合成方法相结合, 预测了 1994 年 Northridge 地震近断层 12 个基岩台站的加速度时程, 并和实际记录进行了对比. 结果表明, 用上述方法和步骤建立的有限断层震源模型是可行、实用的.

关键词: 活断层; 高强体; 有限断层震源模型; 近断层; 地震动随机合成方法.

中图分类号: P315.3

文章编号: 1000-2383(2008)06-0843-09

收稿日期: 2007-12-31

Finite Fault Source Model for Predicting Near-Fault Strong Ground Motion

WANG Hai-yun^{1,2}, XIE Li-li^{1,2}, TAO Xia-xin^{2,1}

1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China

2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

Abstract: A new method and steps of setting up a finite fault source model of a scenario earthquake on an active fault for predicting near-fault strong ground motion are proposed here. Firstly, spatial orientation and slip type of the active fault are deduced from data of seismic geology, seismicity, and geophysics exploration and so on. Secondly, macro-source parameters of the active fault are inferred from seismic scaling laws. Thirdly, the hybrid slip model on the fault plane is generated by combining the asperity model with k square slip model. On the basis of the above mentioned, the finite fault source model of a scenario earthquake (its fault type and moment magnitude the same as 1994 Northridge earthquake's, i. e., the reverse fault and M_w 6.7) is predicted consequently. Lastly, combining the finite fault source model predicted by mentioned-above with stochastic method of synthesizing ground motion using dynamic corner frequency based on seismology, we predict acceleration time histories of the 12 stations during 1994 Northridge earthquake. And comparison between predicted and recorded acceleration time histories shows that the above-mentioned method and the steps of modeling finite fault source model are feasible and practicable.

Key words: active fault; asperity; finite fault source model; near-fault; stochastic method of synthesizing ground motion.

有限断层震源模型在活断层上设定地震的近断层强地震动预测中起着极其重要的作用. 如果断层面上的滑动分布(震源效应)和表示传播介质脉冲反应(传播路径效应)的格林函数都是已知的, 地震在

地表产生的地震动就可以被预测或模拟 (Irikura and Iwata, 1993). 对任何一次具体的地震而言, 震源破裂过程及其断层破裂面上的滑动分布控制了近断层岩石场地之上强地震动的空间分布.

断层滑动过程在时间和空间上都是非常复杂的。

Miyake *et al.* (2003) 已经证实, 高频地震动是由断层面上的高强体(谢礼立和王海云, 2005) 产生的, 而低频地震动主要是由断层面上包围高强体的背景区域产生的。不同的研究人员在近场地震动模拟中往往使用不同的滑动分布模型, 但主要可以分为以下几类: (1) 长周期地震动波形反演得到的滑动分布模型(Beresnev and Atkinson, 1998; Motazedian and Atkinson, 2005); (2) 分形方法产生的滑动分布模型, 例如组合震源模型(Zeng *et al.*, 1994) 和分形震源模型(Frankel, 1995); (3) k 平方滑动模型(Herrero and Bernard, 1994; Bernard *et al.*, 1996); (4) 高强体模型(Somerville *et al.*, 1999); (5) 空间随机场模型(Mai and Beroza, 2002); (6) 混合滑动模型I(长周期地震动波形反演得到的滑动分布模型+ k 平方滑动模型)(Hisada, 2000, 2001; Gallovic and Brokesove, 2004); (7) 混合滑动模型II(高强体模型+ k 平方滑动模型)(王海云, 2004; Wang and Tao, 2004)。

在组合震源模型中, 地震是由许多大小不同、相互重叠且以分形方式分布、充满整个断层破裂面的小震组成。该模型已被成功地用于模拟近断层强地震动以及反演断层面上的滑动分布, 其特点是具有分形的滑动分布, 不用描述高强体的大小。Herrero and Bernard(1994) 以及 Bernard *et al.* (1996) 提出的 k 平方滑动模型, 其主要假定是: 最终滑动分布的空间波数谱以波数平方的倒数(k^{-2}) 衰减。而且, 当波数大于空间拐角波数时, 滑动波数谱以 k^{-2} 衰减; 而当波数小于空间拐角波数时, 滑动与波数无关。Somerville *et al.* (1999) 首次量化了高强体的概念, 将高强者定义为滑动量大于断层破裂面上平均滑动 1.5 倍或以上的区域。把断层离散化成断层元限制了最小高强体的大小。鉴于此, Somerville *et al.* (1999) 提出如下确定高强体的标准: 如果每个断层元的滑动是平均滑动的 2 倍或以上, 要求一个高强者最少占两个断层元; 如果每个断层元的滑动是平均滑动的 1.5 倍或以上, 或者一个断层元的滑动是平均滑动的 2 倍或以上而其他两个断层元的滑动是平均滑动的 1.5 倍或以上, 要求一个高强者至少有 4 个断层元。根据以上概念及标准, Somerville *et al.* (1999) 选择了 15 个浅源地震的滑动模型, 分析、描述了所有高强者模型中所有断层类型的总体滑动特征。在此基础上, 王海云(2004) 及王海云和陶夏新(2005) 选择了 29 个浅源地震的滑动模型, 细分高强者

模型和断层类型, 进一步发展了高强者模型。

对于方法(1)和(6), 其先决条件是: 要具有非常丰富的近断层地震动记录资料, 使之能够反演断层面上的滑动分布特征。但对于大多数地震, 尤其是目前探测到的活断层, 由于地震动记录稀少或缺乏, 很难用反演的方法获取断层面上的滑动分布特征。而其他 5 种方法可在缺乏地震动记录的情况下建立近断层地震动模拟或预测中需要的滑动分布模型。王海云(2004) 提出将高强者模型和 k 平方滑动模型相结合, 模拟活断层上设定地震滑动分布的思路和方法, 取得了较好的效果。

目前, 地震动模拟方法主要有 3 类: 确定性方法、随机方法和混合方法。确定性方法基于 Aki and Richards(1980) 的表示定理, 将地震动表达为震源时间函数和格林函数的卷积, 用于长周期地震动的模拟。常用的方法有: 三维有限差分方法、离散波数法和有限元方法。随机方法基于高斯带限白噪声的随机振动理论方法(Boore, 1983, 2003), 或者基于小震的经验格林函数方法(Hartzell, 1978; Irikura, 1983), 用于短周期(高频)地震动的模拟。经验格林函数方法将目标地震区记录的、适当大小的、与主震震源机制相同的、信噪比高的小震记录作为经验格林函数模拟地震动(Irikura, 1983)。该方法的优点是在地震动模拟中不需要计算波传播路径效应和场地效应, 因为小震记录中已经包含了这些信息; 不足之处是适合于地震动模拟的小震记录不易获取, 尤其是在地震记录稀疏或缺乏地震记录的地区。混合方法利用上述两种方法各自的优点, 将地震动分成长周期和短周期两部分分别进行模拟。长周期地震动用确定性方法模拟, 短周期(高频)地震动用随机方法模拟, 模拟结果分别经低、高通滤波器滤波之后, 在时域中叠加, 得到宽频带的地震动(Kamae *et al.*, 1998; Hartzell *et al.*, 1999; Pitarka *et al.*, 2000)。

对于远源和小震, 一般使用 Boore(1983, 2003) 的随机点源模型模拟地震动; 对于近源或近断层, 地震动的空间分布十分强烈地受到发震断层方位(位置、产状、埋深等)、断层破裂面上滑动分布不均匀性和破裂过程的影响, 需要使用有限断层震源模型来考虑震源破裂过程对近源或近断层地震动的影响。

目前的研究中, 往往通过比较模拟和记录地震动的反应谱或傅氏谱是否拟合作为评判模拟结果是否有效的标准。对于确定性方法, 长周期地震动的反应谱和波形均能很好地拟合; 对于随机方法, 反应

谱一般在短周期(高频)能够很好地拟合,但是地震动波形很难拟合(Somerville, 1998).

本文在已有工作的基础上,提出了活断层上设定地震近断层强地震动预测的有限断层震源模型的建立方法和步骤,且以1994年Northridge(M_w 6.7)地震为例,建立设定地震(M_w 6.7)的有限断层震源模型.并将预测的有限断层震源模型与基于地震学的、使用动力学拐角频率的地震动随机合成方法相结合,预测了该次地震近断层12个基岩台站的加速度时程.通过与实际记录的比较,验证本文方法的可行性和实用性.

1 方法

1.1 有限断层震源模型

有限断层震源模型的建立主要是震源参数的确定.根据Irikura(2000),将震源模型参数分为2类:全局震源参数和局部震源参数.前者表征震源区的宏观特征,例如地震断层的空间方位(位置、产状、埋深),断层破裂尺度(长度、宽度、面积),断层面上平均滑动和平均破裂速度等;后者表示断面上的不均匀性或粗糙度,主要用滑动分布来表征.这两类参数的估计方法如下.

全局震源参数:(1)根据地震地质和地震活动性调查以及地球物理勘探等资料确定活断层的空间方位和滑动类型;(2)根据活断层地震危险性评价的结果,获得活断层设定地震的矩震级,根据地震断层破裂尺度及断层面上平均滑动与矩震级之间的地震定标律估计相应的参数值(Wang and Tao, 2003; 王海云, 2004).

局部震源参数:(1)高强体模型,根据高强体参数分别与矩震级和相应断层参数之间的关系式确定高强体模型的参数——高强体的位置、大小及其之上的平均滑动量(王海云, 2004; Wang and Tao, 2004; 王海云和陶夏新, 2005);(2) k 平方滑动模型,根据空间拐角波数与矩震级之间的关系式确定相应的空间拐角波数值(王海云, 2004).当波数大于空间拐角波数时,断层面上滑动分布的空间波数谱以 k^{-2} 衰减.用 k 平方滑动模型(Gallovic and Brokesove, 2004)生成随机滑动分布;(3)高强体模型和 k 平方滑动模型叠加在一起生成断面上的混合滑动分布(王海云, 2004; Wang and Tao, 2004).

有限断层震源模型建立的步骤如下:

(1)根据地震地质和地震活动性调查以及地球物理勘探等资料,确定活断层的空间方位和滑动类型;

(2)根据地震危险性评价给定的设定地震的矩震级(M_w),利用地震定标率确定全局震源参数,例如断层破裂面积、破裂长度和宽度,以及断层破裂面上的平均滑动;

(3)根据经验关系式,确定高强体的各种参数值,例如所有高强体的面积及其上的平均滑动,最大高强体的面积、长度、宽度、中心位置及其上的平均滑动,第二高强体的面积及其上的平均滑动等;

(4)在断层破裂面上划分 $1.0\text{ km} \times 1.0\text{ km}$ 的网格,确定最大高强体和第二高强体在断层破裂面上的位置,并对每个网格赋予相应的滑动值;

(5)将断层破裂面离散化成 $2^M \times 2^N$ 个网格,一般为 256×256 或者 128×128 个网格,然后进行插值和平滑;

(6)用傅氏变换将上述产生的高强体模型从空间域变换到波数域;

(7)当波数大于空间拐角波数时,使用有随机相位的二维滑动谱函数,即 k 平方滑动模型,下式(1),产生随机滑动分布.

$$D(k_x, k_y) = \frac{\bar{D} \cdot L \cdot W}{\sqrt{1 + \left[\left(\frac{k_x L}{K} \right)^2 + \left(\frac{k_y W}{K} \right)^2 \right]^{1/2}}} e^{i\Phi(k_x, k_y)}, \quad (1)$$

式中: L, W 分别为断层破裂长度和宽度; \bar{D} 为断层破裂面上的平均滑动; k_x, k_y 分别为沿走向和下倾方向的空间波数; $k_x = K/L, k_y = K/W$ 分别为沿走向和下倾方向的空间拐角波数, Gallovic and Brokesove(2004)认为 $K=1$ 比较恰当; $\Phi(k_x, k_y)$ 为随机相位.

(8)将第(6)步产生的高强体模型和第(7)步产生的 k 平方滑动模型在波数域叠加,生成混合滑动模型;

(9)将上述混合滑动模型用傅氏变换从波数域变换到空间域,即得到空间域的混合滑动模型.

Hisada(2001)将反演滑动模型与 k 平方滑动模型结合生成混合滑动模型时,为了避免反演滑动模型中因某些边缘急剧变化引起的谱洞,首先线性插值,然后用双三次样条函数平滑,这一步是必要的.本文所用的插值和平滑方法比较简单,也比较实用,即每一个大网格被进一步细分成若干个目标小网格

以后,每个小网格取大网格的值;然后用移动平均窗进行平滑,达到高强体边缘钝化的目的。

1.2 近断层地震动随机模拟

近断层强地震动模拟中,有限断层震源模型的断层面被分成 N 个大小相等的矩形子断层,每个子断层即为一个点源,亦称子源。破裂过程以一定的破裂速度(一般取 0.8 倍的剪切波速)从破裂起始点开始呈辐射状向外传播,传播到每个子源的中心时该子源即被触发。每个子源引起的地震动由 Boore (1983, 2003) 的点源模型计算。所有子源在观测点引起的地震动在时域中以适当的延迟时间叠加,可获得观测点的地震动时程。

$$a(t) = \sum_{i=1}^{N_L} \sum_{j=1}^{N_W} a_{ij}(t + \Delta t_{ij}), \quad (2)$$

其中, N_L 和 N_W 分别是沿着断层走向和倾向方向的子断层数; $N_L \times N_W = N$ 为子源总数; Δt_{ij} 包括破裂传播到第 ij 个子源引起的时间滞后和从第 ij 个子源至场点间由于传播距离的不同引起的时间滞后; $a_{ij}(t)$ 是第 ij 个子源引起的观测点地震动。

每个子源的地震矩由下式计算:

$$M_{0ij} = M_0 \frac{\bar{D}_{ij}}{\sum_{i=1}^{N_L} \sum_{j=1}^{N_W} \bar{D}_{ij}}, \quad (3)$$

其中, M_0 是地震矩,单位是 $\text{dyne} \cdot \text{cm}$ ($1 \text{ dyne} = 10^{-5} \text{ N}$); \bar{D}_{ij} 是第 ij 个子断层上的平均滑动,单位是 cm 。

合成地震动时,震源谱中的拐角频率如果使用 Brune(1970)的静力学拐角频率,则对于子断层的大小严格的要求。而且,为了保证地震矩的守恒,每个子源需要触发多次。

Beresnev and Atkinson(2001)确定的子断层大小为:

$$\log \Delta L = -2.0 + 0.4 M_w. \quad (4)$$

如果改变子断层的大小,往往导致断层辐射的总辐射能不守恒。而且合成大震时要求子震的震级在 5.0 到 6.5 的范围之内,限制了小震地震动的模拟。

为了避免对每个子源的多次触发以及对子断层及矩震级大小的限制,保证地震矩和辐射能的守恒, Motazedian and Atkinson(2005)提出动力学拐角频率的概念:

$$f_{\text{aj}}(t) = 4.9 \times 10^6 \beta (\Delta \sigma / M_{\text{ovave}})^{1/3} \cdot N_R(t)^{-1/3}, \quad (5)$$

式中, $f_{\text{aj}}(t)$ 是第 ij 个子断层的动力学拐角频率; t 是第 ij 个子源被触发的时刻; $N_R(t)$ 是在时刻 t 已

破裂子断层的累积数; β 是震源附近的剪切波速度,单位为 km/s ; $\Delta \sigma$ 是应力降,单位为 bar ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$); $M_{\text{ovave}} = M_0 / N$ 是子断层的平均地震矩。

第 ij 个子断层的加速度谱 $A_{ij}(f)$ 是:

$$A_{ij}(f) = \frac{CM_{\text{aj}} H_{ij} (2\pi f)^2}{1 + (f/f_{\text{aj}})^2}, \quad (6)$$

$$\text{其中 } H_{ij} = \left[N \frac{\sum \left\{ \frac{f^2}{1 + (f/f_c)^2} \right\}^2}{\sum \left\{ \frac{f^2}{1 + (f/f_{\text{aj}})^2} \right\}^2} \right]^{1/2}, \quad (7)$$

M_{aj} 是第 ij 个子断层的地震矩; f 是频率; f_c 是静力学拐角频率, $f_c = 4.9 \times 10^6 \beta (\Delta \sigma / M_0)^{1/3}$ 。

2 实例

1994 年 1 月 17 日发生在美国加利福尼亚州的 Northridge 地震 ($M_w 6.7$) 震中位于 Northridge 镇, 纬度 34.213° , 经度 -118.537° , 震源深度 17.5 km , 发震断层没有破裂到地表, 其上界埋深为 5 km 。断层类型为逆断层, 断层走向 122° , 倾角 40° , 倾向 212° , 滑动角 101° 。

2.1 有限断层震源模型建立

用上述方法和步骤建立的设定地震的有限断层震源模型参数如表 1。与 1994 年 Northridge 地震反演的震源模型参数相比较, 反映断层面上主要滑动特征的大多数参数值基本上是相近或一致的。例如, 断层破裂面上的平均滑动, 最大、第二高强体上的平均滑动, 最大高强体的面积、长度和宽度及其中心位置等。但也有一些重要参数, 如断层破裂尺度(面积、长度和宽度)等则有较大的差别, 并引起空间拐角波数、地震破裂初始点位置等参数相差较大。其原因主要是: 1994 年 Northridge 地震的破裂尺度是根据主震发生之后几天内的余震分布确定的; 本文是根据经验关系式确定的, 二者之间必然有一些差异。

用上述方法和步骤生成了设定地震的 30 个滑动分布, 这里只展示了其中的 12 个, 见图 1。从这些图可见, 反映低波数的确定性部分(高强体模型)很稳定地表达了滑动的总体分布特征; 反映高波数的随机部分由 k 平方滑动模型控制, 表现出较大的随机变化。

2.2 近断层地震动预测

使用动力学拐角频率的地震动随机合成方法预测了 1994 年 Northridge 地震近场 12 个基岩台站

表 1 预测的设定地震(M_w 6.7)的有限断层震源模型参数与 1994 年 Northridge 地震震源参数比较

Table 1 Comparison between parameter values of finite fault source models of both 1994 Northridge earthquake (M_w 6.7) and a scenario earthquake (M_w 6.7) on an active fault

参数类型		震源参数值	
		Northridge 地震	设定地震
断层参数	破裂面积(km^2)	378.00	448.00
	破裂长度(km)	18.00	28.00
	破裂宽度(km)	21.00	16.00
	断层面上的平均滑动(cm)	101.85	100.00
高强体数		2.00	2.00
高强体面积	所有高强体的面积(km^2)	68.00	95.50
	最大高强体的面积(km^2)	60.00	66.07
	第二高强体的面积(km^2)	8.00	29.43
高强体上的平均滑动	最大高强体上的平均滑动(cm)	201.59	218.78
	第二高强体上的平均滑动(cm)	177.92	190.55
最大高强体尺度	长度(km)	10.00	11.00
	宽度(km)	6.00	6.00
最大高强体的位置	中心沿走向的坐标(km)	8.00	8.26
	中心沿下倾方向的坐标(km)	8.00	8.02
空间拐角波数	沿走向的空间拐角波数(km^{-1})	5.56×10^{-2}	3.57×10^{-2}
	沿下倾方向的空间拐角波数(km^{-1})	4.76×10^{-2}	6.25×10^{-2}
破裂起始点位置	沿走向的坐标(km)	14.70	11.94
	沿下倾方向的坐标(km)	19.40	13.01

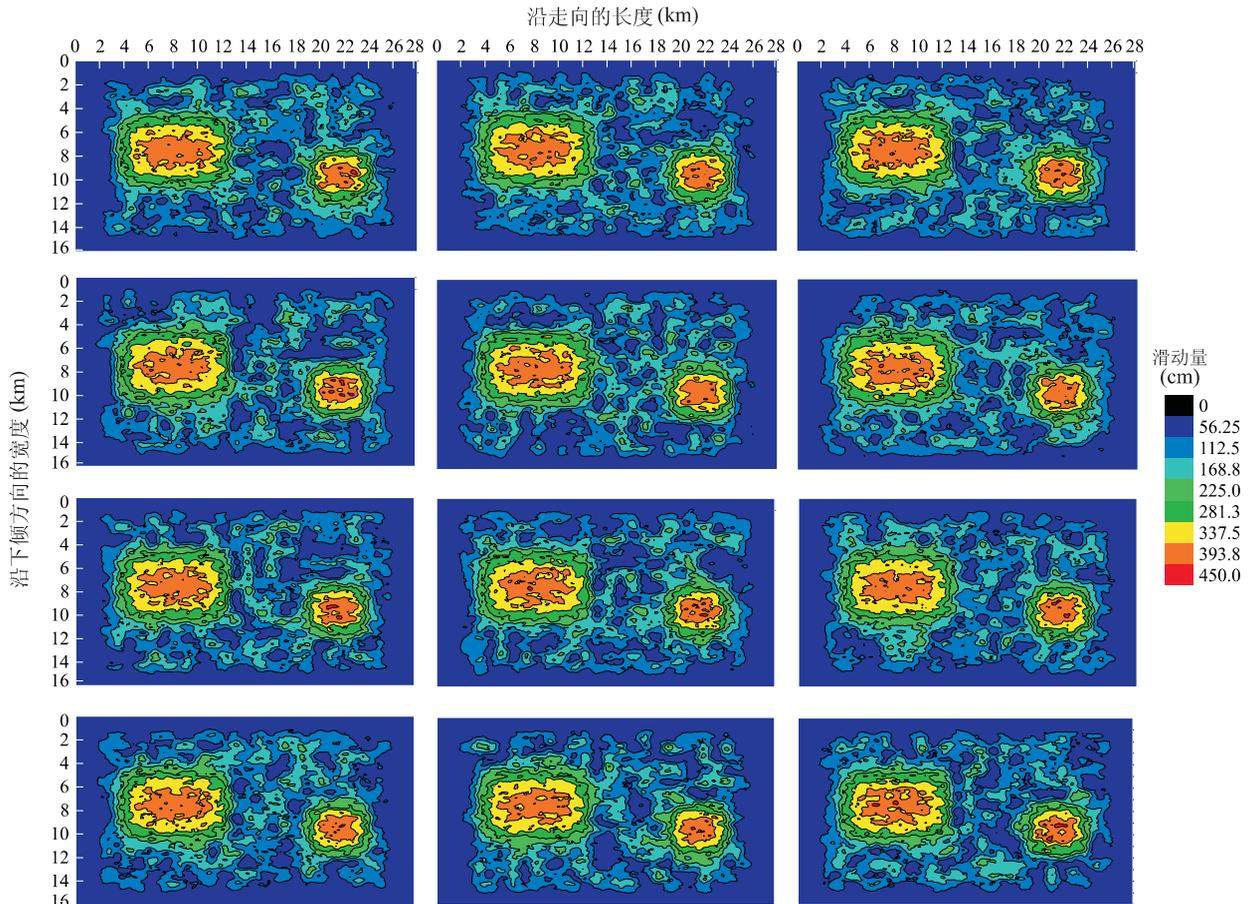


图 1 用混合滑动模型生成的设定地震(M_w 6.7)的 30 个滑动分布中的 12 个

Fig. 1 Twelve of 30 slip distributions of scenario earthquake (M_w 6.7) generated by hybrid slip model

表 2 1994 年 Northridge 地震近断层 12 个基岩台站的经纬度和震源距

Table 2 The geographic coordinates and source distances of twelve near-fault base-rock stations of 1994 Northridge earthquake for predicting ground motion

台站名称	纬度(°)	经度(°)	位置	震源距(km)
ANB	34.758	-118.361	Antelope Buttes	59.69
L09	34.610	-118.560	Lake Hughes #9	41.05
LRB	34.486	-117.980	Littlerock-Brainard Canyon	60.12
LV3	34.596	-118.243	Leona Valley #3	49.00
MCN	34.087	-118.693	Malibu Canyon-Monte Nido Fire Station	26.32
MSM	34.086	-118.481	USC #15	24.38
ORR	34.560	-118.640	Castaic-Old Ridge Route	36.60
PCD	34.334	-118.396	Pacoima Dam Downstream	21.44
PKC	34.288	-118.375	Pacoima-Kagel Canyon	21.51
PVC	33.746	-118.396	Rancho Palos Verdes-Hawthorne Blvd	60.49
SCT	34.106	-118.454	Stone Canyon Reservoir Dam	23.55
SSA	34.231	-118.713	Santa Susana	19.55

的地震动。12 个台站的经纬度和震源距如表 2。这些台站的位置分布见 Beresnev and Atkinson(1998)文献中的图 1, 这里不再罗列。除了断层面左侧之外, 断层面的其他方向均有台站分布。

路径传递函数使用 Atkinson and Boore(1995)预测北美东部地震动时的三段型几何扩散模型:

$$Z(R) = \begin{cases} 1/R & R < 70 \text{ km} \\ 1/70 & 70 \text{ km} \leq R < 130 \text{ km} \\ (1/70) \sqrt{130/R} & 130 \text{ km} \leq R \end{cases} \quad (8)$$

路径持时采用 Atkinson 和 Boore(1998)针对北美东部提出的经验关系:

$$T(R) = \begin{cases} 0 & R < 10 \text{ km} \\ 0.16(R-1) & 10 \text{ km} \leq R < 70 \text{ km} \\ 9.6 - 0.03(R-70) & 70 \text{ km} \leq R < 130 \text{ km} \\ 7.8 + 0.04(R-130) & 130 \text{ km} \leq R \end{cases} \quad (9)$$

根据 Beresnev and Atkinson(1998), Northridge 震区品质因子随频率变化的关系式为 $Q(f) = 150f^{0.5}$ 。

综上所述, 将 1994 年 Northridge 地震近断层基岩场地上地震动预测需要输入的参数归纳为表 3。

图 2 为预测和记录的 12 个基岩台站的加速度时程及其相应反应谱的比较。从图中可见, 12 个基岩台站中, 除了 ORR 台站预测的加速度时程严重偏低, L09、MCN 和 SSA 三个台站预测的反应谱分别在 0.6 s、0.8 s 和 0.5 s 以上严重偏高之外, 其他 8 个台站在 0.1~1 s 范围内预测与记录加速度的反应谱均拟合较好。

Beresnev and Atkinson(1998)基于 Wald *et al.*

表 3 1994 年 Northridge 地震近断层基岩场地上地震动预测输入参数

Table 3 The input parameters for predicting ground motion of near-fault base-rock stations of 1994 Northridge earthquake (M_w 6.7)

参数名称	参数值
断层方位	走向 122°, 倾角 40°
断层沿走向和下倾方向的尺度(km)	28×16
断层上界埋藏深度(km)	5.0
矩震级(M_w)	6.7
子断层大小(km)	1×1
应力降(10^5 Pa)	75
滑动分布	混合滑动模型生成的 30 个滑动分布(图 1)
几何衰减	式(9)
地震动路径持时	式(10)
品质因子	式(11)
地壳放大模型	Boore and Joyner(1997)的普通岩石场地模型
窗函数	Saragoni-Hart(1974)窗
kappa 参数	0.04
地壳剪切波速($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	3.7
破裂速度($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.8×地壳剪切波速
地壳密度(g/cm^3)	2.8

(1996)反演的滑动模型用随机方法模拟了 1994 年 Northridge 地震近断层 12 个基岩台站的加速度时程, 并与实际记录进行了比较。其中 ORR 台站模拟的加速度峰值同样严重偏低, Beresnev and Atkinson 认为是地形影响的结果, 并且指出, 局部地质、地貌或盆地的传播效应会显著地影响个别台站的地震动记录, 为了更精确地预测场地的地震动, 应该建立每个台站的经验反应。

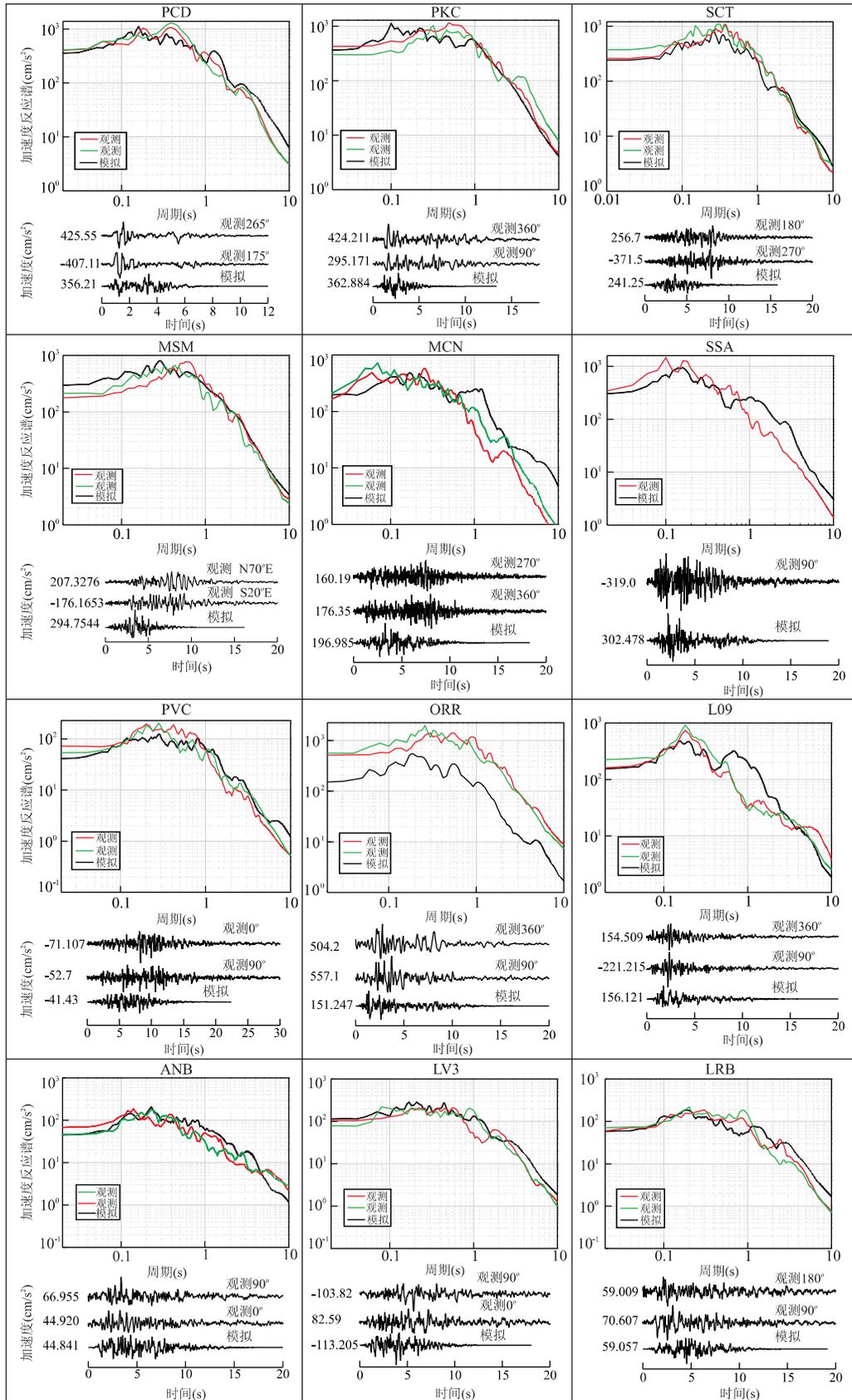


图 2 1994 年 Northridge 地震 (M_w 6.7) 近断层 12 个基岩台站预测和记录加速度时程及其相应反应谱的比较

Fig. 2 Comparisons between predicted and recorded acceleration time histories and their response spectra for twelve near-fault stations in 1994 Northridge earthquake

3 结语

建立有限断层震源模型是活断层上设定地震近断层强地震动预测中极其重要的一个环节。本文建立的有限断层震源模型,只有 k 平方滑动模型中的相位函数是随机的,其他物理量都是确定性的,更好地反映了地震震源模型的共同特点。

本文在建立有限断层震源模型基础上,使用动力学拐角频率的地震动随机方法预测了 1994 年 Northridge 地震近断层 12 个基岩台站的加速度时程。与 Beresnev and Atkinson(1998)基于 Wald *et al.* (1996)反演的滑动分布模型模拟的 1994 年 Northridge 地震近断层 12 个基岩台站的结果从整体效果上相对照,本文方法可以在大体相同的精度上模拟或预测近断层高频地震动,同时,也表明本文提出的建立活断层上有限断层震源模型的方法和步骤是可行、实用的。

从预测结果来看,大多数台站在 0.1~1 s 周期范围内预测和记录的加速度反应谱拟合较好。如果能够把每个台站真实的场地反应单独输入,而不是使用统一的场地反应模型(文中使用 Boore and Joyner 的普通岩石场地模型),预测结果可能会更好。

致谢:本文得到国家重点基础研究发展规划“973”项目(No. 2007CB714201)、国家自然科学基金重大研究计划项目(No. 90715038)和中国地震局工程力学研究所基本科研项目(No. 2007B13)的资助。在此深表感谢!同时也非常感谢为本文提出有益问题的匿名评审专家以及付出艰辛劳动的编辑。

References

- Aki, K., Richards, P. G., 1980. Quantitative seismology: Theory and methods. WH Freeman & Co Ltd., New York.
- Atkinson, G. M., Boore, D. M., 1995. Ground motion relations for eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(1):17-30.
- Atkinson, G. M., Boore, D. M., 1998. Evaluation of models for earthquake source spectra in eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(4):917-934.
- Beresnev, I. A., Atkinson, G. M., 1998. Stochastic finite-fault modeling of ground motions from the 1994 Northridge, California, earthquake. I. Validation on rock sites. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(6):1392-1401.
- Beresnev, I. A., Atkinson, G. M., 2001. Subevent structure of large earthquakes—A ground motion perspective. *Geophysical Research Letters*, 28(1):53-56.
- Bernard, P., Herrero, A., Berge, C., 1996. Modeling directivity of heterogeneous earthquake ruptures. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(4):1149-1160.
- Boore, D. M., 1983. Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73(6A):1865-1894.
- Boore, D. M., 2003. Simulation of ground motion using the stochastic method. *Pure and Applied Geophysics*, 160:635-676.
- Boore, D. M., Joyner, W. B., 1997. Site amplifications for generic rock sites. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(2):327-341.
- Brune, J. N., 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 75(26):4997-5009.
- Frankel, A., 1995. Simulating strong motions of large earthquakes using recordings of small earthquakes: The Loma Prieta mainshock as a test case. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(4):1144-1160.
- Galovic, F., Brokesove, J., 2004. On strong ground motion synthesis with k^{-2} slip distributions. *Journal of Seismology*, 8:211-224.
- Hartzell, S. H., 1978. Earthquake aftershocks as Green's functions. *Geophysical Research Letters*, 5(1):1-4.
- Hartzell, S. H., Harmsen, S., Frankel, A., et al., 1999. Calculation of broadband time histories of ground motion: Comparison of methods and validation using strong-ground motion from the 1994 Northridge earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(6):1484-1504.
- Herrero, A., Bernard, P., 1994. A kinematic self-similar rupture process for earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4):1216-1228.
- Hisada, Y., 2000. A theoretical omega-square model considering the spatial variation in slip and rupture velocity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(2):387-400.
- Hisada, Y., 2001. A theoretical omega-square model considering the spatial variation in slip and rupture velocity, Part 2: Case for a two-dimensional source model. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(4):651-666.

- Irikura, K., 1983. Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes. *Bulletin, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Kyoto, Japan*, 33: 63—104.
- Irikura, K., 2000. Prediction of strong ground motions from future earthquakes caused by active faults—Case of the Osaka basin. 12th World Conference on Earthquake Engineering (12WCEE), CDROM, No. 2687. Auckland, New Zealand during 30 January-4 February, 2000.
- Irikura, K., Iwata, T., 1993. Simulation prediction of strong ground motion: Theoretical approach. In: The Architectural Institute of Japan, ed., *Earthquake motion and ground conditions*. The Architectural Institute of Japan, 337.
- Kamae, K., Irikura, K., Pitarka, A., 1998. A technique for simulating strong ground motion using hybrid Green's function. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(2): 357—367.
- Mai, P. M., Beroza, G. C., 2002. A spatial random field model to characterize complexity in earthquake slip. *Journal of Geophysical Research*, 107(B11): 2308.
- Miyake, H., Iwata, T., Irikura, K., 2003. Source characterization for broadband ground-motion simulation: Kinematic heterogeneous source model and strong motion generation area. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(6): 2531—2545.
- Motazedian, D., Atkinson, G. M., 2005. Stochastic finite-fault modeling based on a dynamic corner frequency. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(3): 995—1010.
- Pitarka, A., Somerville, P., Fukushima, Y., et al., 2000. Simulation of near-fault strong-ground motion using hybrid Green's functions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(3): 566—586.
- Saragoni, G. R., Hart, G. C., 1974. Simulation of artificial earthquakes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2(3): 249—267.
- Somerville, P. G., 1998. Emerging art: Earthquake ground motion. In: Dakolas, P., Yegian, M., eds., *Proceedings-geotechnical earthquake engineering and soil dynamics III*. ASCE Speciality Conf. Special Pub. No. 75, Seattle, WA, 1—38.
- Somerville, P., Irikura, K., Graves, R., et al., 1999. Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion. *Seismological Research Letters*, 70(1): 59—80.
- Wald, D. J., Heaton, T. H., Hudnut, K. W., 1996. The slip history of the 1994 Northridge, California, earthquake determined from strong-motion, teleseismic, GPS, and leveling data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(1B): S49—S70.
- Wang, H. Y., 2004. Finite fault source model for predicting near field strong ground motion: [Disertation]. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin (in Chinese).
- Wang, H. Y., Tao, X. X., 2003. Relationships between moment magnitude and fault parameters: Theoretical and semi-empirical relationships. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2(2): 201—211.
- Wang, H. Y., Tao, X. X., 2004. Hybrid slip model for predicting near-field strong ground motion. In: 2004 ANCEER annual meeting: Networking of young earthquake engineering researchers and professionals. CDROM, July 28—30, 2004, The Sheraton Princess Kaiulani, Honolulu, Hawaii.
- Wang, H. Y., Tao, X. X., 2005. Characterizing a shallow earthquake asperity model for predicting near field strong ground motion. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 37(11): 1533—1539 (in Chinese with English abstract).
- Xie, L. L., Wang, H. Y., 2005. A proposal of Chinese translation of three technical terms in near-field seismology. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 25(5): 198—200 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, Y. H., Anderson, J. G., Yu, G., 1994. A composite source model for computing realistic synthetic strong ground motions. *Geophys. Res. Lett.*, 21: 725—728.

附中文参考文献

- 王海云, 2004. 近场强地震动预测的有限断层震源模型(博士论文). 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 王海云, 陶夏新, 2005. 近场强地震动预测中浅源地震的 Asperity 模型特征. 哈尔滨工业大学学报, 37(11): 1533—1539.
- 谢礼立, 王海云, 2005. 近场地震学中 3 个术语译名的商榷. 地震工程与工程振动, 25(6): 198—200.